

MAGNETRESONANZ-VELOCIMETRIE IN WASSERSTOFFBRENNKAMMERN – EIN ERSTER VERGLEICH MIT CFD

Swantje ROMIG^{1(*)}, Nina PAULITSCH², Fabrice GIULIANI³, Sven GRUNDMANN⁴, Robert KREWINKEL⁵, Martin BRUSCHEWSKI⁶

Inhalt

Eine der vielen Möglichkeiten zur Dekarbonisierung der Industrie beizutragen, ist die Nutzung von alternativen Brennstoffen, die bei der Verbrennung kein CO₂ freisetzen, wie beispielsweise Wasserstoff. Doch die Verbrennung von Wasserstoff verhält sich anders als für konventionelle fossile Brennstoffe. Im Designprozess werden oft Simulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) genutzt, um die Strömung des Brenngases und der Luft sowie deren Mischung und Verbrennung vorherzusagen. Die Simulation nutzt dabei einige Modellannahmen, die zu Unsicherheiten führen, weshalb eine Validierung mittels experimenteller Daten wichtig ist.

Eine Messtechnik, die bereits zur Validierung von Kühlströmungen genutzt wird [1, 2], ist die Magnetresonanz-Velocimetrie (MRV). Da das MRT-Gerät im MRI Flow Lab der Universität Rostock ein medizinisches MRT ist, das auf die Resonanzfrequenz von Wasser im menschlichen Körper eingestellt ist, ist das Labor auf Wasser als Arbeitsfluid eingeschränkt. Um die Vergleichbarkeit der Experimente mit Simulationen sicherzustellen, können Ähnlichkeitskennzahlen genutzt werden, die die Strömungen vergleichbar machen. In der Strömungsmechanik ist dies die Reynoldszahl. Im Experiment wird außerdem sowohl die Luft als auch der Wasserstoff durch Wasser ersetzt. Um dem ursprünglichen Dichteunterschied gerecht zu werden, wird der Wasserstoffstrom mit dem Impulsflussverhältnis skaliert.

Ziel dieser Studie ist es, zu untersuchen, wie die MRV zur Validierung von CFD-Daten oder im Designprozess im Bereich von Wasserstoffbrennkammern eingesetzt werden kann, und insbesondere, ob die genutzten Ähnlichkeitskennzahlen dafür geeignet sind. Dafür wird eine konkrete Geometrie für eine für die Wasserstoffverbrennung entwickelte Brennkammer genutzt [3, 4], welche in Abbildung 1 (a) zu sehen ist.

Methodik

Das Modell wurde aus den MR-kompatiblen Materialien Acrylglas und Polyamid gefertigt. Um eine bessere relative Auflösung zu erreichen, wurde das Modell um den Faktor 2,8 größer als die Originalgeometrie skaliert, sodass insbesondere die Injektoren noch ausreichend aufgelöst werden. Mit einer konstanten Reynoldszahl für den gewünschten Betriebspunkt ergeben sich so Geschwindigkeiten, welche sich gut mittels MRV messen lassen. Der gewählte Betriebspunkt hat in Verbrennungsexperimenten [3] stabile Verbrennung gezeigt. Da die Mischprozesse vor der Verbrennung wichtig für die Emissionswerte und Stabilität der Verbrennung sind, wurden an diesem Betriebspunkt mittels MR-Messtechnik das mittlere Geschwindigkeitsfeld, die turbulente kinetische Energie (TKE) [5] und die Konzentration [6] des Kontrastmittels Kupfersulfat, das den Wasserstoff modelliert, gemessen. Die Konzentration wird dabei auf die Referenzkonzentration, welche aus dem Injektor austritt, normiert.

Die Simulation wurde mit OpenFoam 2.4.0 durchgeführt, wobei der Flamelet-Ansatz genutzt wurde. Der Flamelet-Ansatz nutzt vortabellierte 1D-Flamelets zur Beschreibung der lokalen Chemie, Temperatur und der Reaktionen der Verbrennung. Mittels Mischungsbruch und skalarer Dissipationsrate werden die lokale Mischung sowie die Verzerrung und Streckung der Flamme durch das turbulente Strömungsfeld beschrieben. Das bedeutet, dass die Zündung des Gemisches automatisch dort beginnt, wo der Mischungsbruch und die skalare Dissipationsrate innerhalb eines brennenden Flamelets liegen. Dies

^{1, 4, 6} Lehrstuhl Strömungsmechanik, Universität Rostock, Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock, Deutschland, vorname.nachname@uni-rostock.de, lsm.uni-rostock.de

^{2, 5} Institut für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25 a, 8010 Graz, Österreich, vorname.nachname@tugraz.at

³ Combustion Bay One e.U. advanced combustion management, Schuetzenhofgasse 22/7, 8010 Graz, Österreich, Fabrice.Giuliani@CBOne.at

führt hier zu einer teils angehängten Flamme, wodurch das Geschwindigkeitsfeld nach dem Injektor von der Flammengeschwindigkeit abhängt.

Ergebnisse

Abbildung 1 (b) und (c) zeigen einen Schnitt durch die Brennkammer. Die Strömung verläuft von links nach rechts. Dabei fließt die Luft von innen und außen um den Injektor herum und der Wasserstoff tritt durch 11 kleine Injektoren aus. (b) zeigt die normierten mittels MRV gemessenen Geschwindigkeiten abgebildet, (c) die entsprechenden Ergebnisse aus der CFD. Die Strömungsfelder sind sich sehr ähnlich und das Einspritzmuster ebenfalls. Unterschiede sind im Öffnungswinkel der Strömung am Injektaustritt und hinter der Querschnittserweiterung zu erkennen. Dies wird auch durch die Drallzahl bestätigt. Für die CFD liegt diese überall bei ungefähr 0,15, für die MRV liegt sie in der Vormischzone bei etwa 0,3 und in der Querschnittserweiterung bei rund 0,5. Dies lässt sich durch die deutlich höheren tangentialen Geschwindigkeiten in den MRV-Daten erklären. Dennoch ist die Drallzahl für beide Datensätze im Bereich unter 0,6, sodass zwar Drall vorhanden ist, sich aber keine zentrale Rezirkulationszone ausbildet. Mögliche Gründe für die Unterschiede zwischen CFD und MRV sind die leicht unterschiedlichen Betriebspunkte, bei denen zwar der Äquivalenzratio mit ca. 0,3 sehr ähnlich ist, der Luftvolumenstrom aber mit 6,5 g/s für MRV und 4,3 g/s für die CFD variiert. Zudem wurde in der Simulation die Verbrennung mitmodelliert, welche einen Einfluss auf das Strömungsfeld hat.

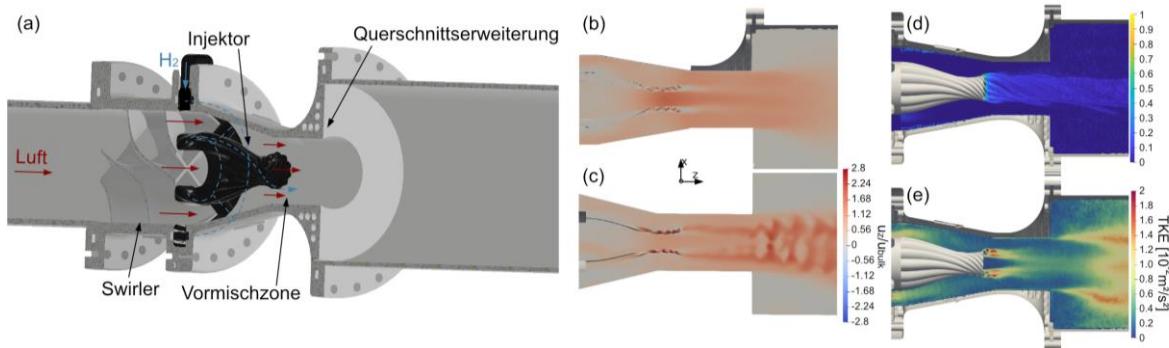


Abbildung 1: (a) Aufbau des untersuchten Injektors, normierte axiale Geschwindigkeit MRV (b) und CFD (c), MRV Daten: Konzentration des Kupfersulfates und Stromlinien (d) und TKE (e)

Abbildung 1 (d) zeigt zudem die Konzentration des modellierten Wasserstoffs im Experiment und (e) die TKE. Die Konzentration nimmt hinter dem Injektor sehr schnell ab, was eine gute Vermischung von Luft und Wasserstoff nahelegt. Ein Grund für die schnelle Vermischung ist dabei die hohe TKE in der Region um den Injektaustritt, da Turbulenz die Vermischung beschleunigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Wasserkanalexperimente mit MRV und einer Impulsflussverhältnis-Skalierung genutzt werden können, um die Platzierung von Wasserstoff gut vorherzusagen. Die Messungen erlauben zudem Einblicke in das Mischverhalten.

Referenzen

- [1] Siekman, Mike, et al. "A Combined CFD/MRV study of flow through a pin bank." Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Vol. 45714. American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [2] John, Kristine, et al. "Volumetric Measurements of Mean Velocity Vector and Reynolds Stress Tensor for CFD Validation: Magnetic Resonance Velocimetry in a Nuclear Fuel Assembly Model with Mixing Grids." Flow, Turbulence and Combustion 115.1 (2025): 221-241.
- [3] Paulitsch, Nina, Fabrice Giuliani, and Andrea Hofer. "Validation of a combined optic-acoustic probe on hydrogen flames using an atmospheric lean premix pilot burner." 2023 Symposium on Thermoacoustics in Combustion: SoTiC 2023. 2023.
- [4] Paulitsch, Nina, et al. "Progress on the Complete and low-NOx combustion of eco-fuels using a thermo-acoustically-driven, hydrogen-powered pilot stage." Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Vol. 86946. American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- [5] Romig, Swantje, et al. "Improving MRI turbulence quantification by addressing the measurement errors caused by the derivatives of the turbulent velocity field—Sequence development and in-vitro validation." Magnetic Resonance Imaging 117 (2025): 110333.
- [6] Benson, Michael J., et al. "Three-dimensional concentration field measurements in a mixing layer using magnetic resonance imaging." Experiments in Fluids 49.1 (2010): 43-55.